

## ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 520.33, 536.46, 778.3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ

© 2024 г. М. М. Алексеев, О. Ю. Семенов

Поступила в редакцию 02.04.2023 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принята к публикации 08.07.2023 г.

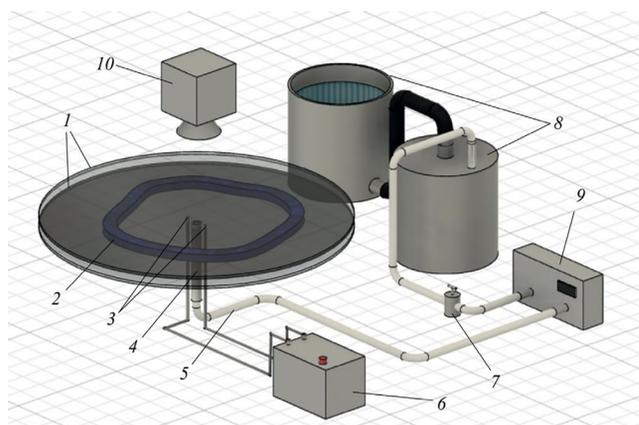
DOI: 10.31857/S0032816224010292, EDN: FMXLPG

Исследование распространения пламени в каналах и камерах сгорания различной конфигурации является актуальной инженерной задачей в связи с постоянной работой над усовершенствованием энергетических устройств, использующих тепловую энергию [1–12].

В работе описывается экспериментальная установка для изучения распространения пламени в микроканалах. Данная установка состоит из нескольких отдельно расположенных технических приборов и устройств. Основным элементом установки является открытая камера сгорания, собранная из двух прозрачных стеклянных дисков диаметром 60 см, расположенных параллельно относительно друг друга, на расстоянии, определяемом условиями эксперимента. В центральной части нижнего диска имеется отверстие для подключения втулки с соплом подачи газовой смеси и электродами для ее воспламенения (рис. 1).

Расстояние между прозрачными дисками камеры сгорания опытной установки изменялось от 1.5 до 15 мм (точность измерений этого расстояния составляла 0.001 мм) с помощью калибровочных металлических шайб по периферии дисков.

Горючие газовые смеси – пропан–воздух и метан–воздух выбранной концентрации от 2.1 до 9.5% для пропана в воздухе и от 5 до 15% для метана в воздухе производились в газометре вытеснения, который представлял собой два резервуара – один был открыт сверху, второй был закрытым со всех сторон цилиндром, имеющим два технических отверстия для подключения двух шлангов подачи газа, воздуха и отбора воды. Объем газовой смеси, поступающей



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – прозрачные диски, 2 – фронт пламени, 3 – искровые электроды, 4 – входное сопло с пламегасителем, 5 – газовый шланг подачи смеси, 6 – искровой разрядник, 7 – вентиль, 8 – газометр вытеснения, 9 – расходомер газа, 10 – высокоскоростная фотокамера.

между пластинами, измерялся расходомером газа РГС-2 с точностью до 1.5%. Для предотвращения обратного хода пламени и возгорания установки применялся пламегаситель, состоящий из стальной трубки, заполненной тонкой медной проволокой, установленной в систему подачи газа между дисками в центре.

Для обеспечения необходимого процентного соотношения пропана в воздухе в камере сгорания пространство между дисками продувалось горючей смесью. Объем запускаемой смеси в три раза превышал объем камеры сгорания. При заполнении пространства камеры сгорания горючей смесью периметр щели по краю дисков закрывался для уменьшения интенсивности ее перемешивания с окружающим

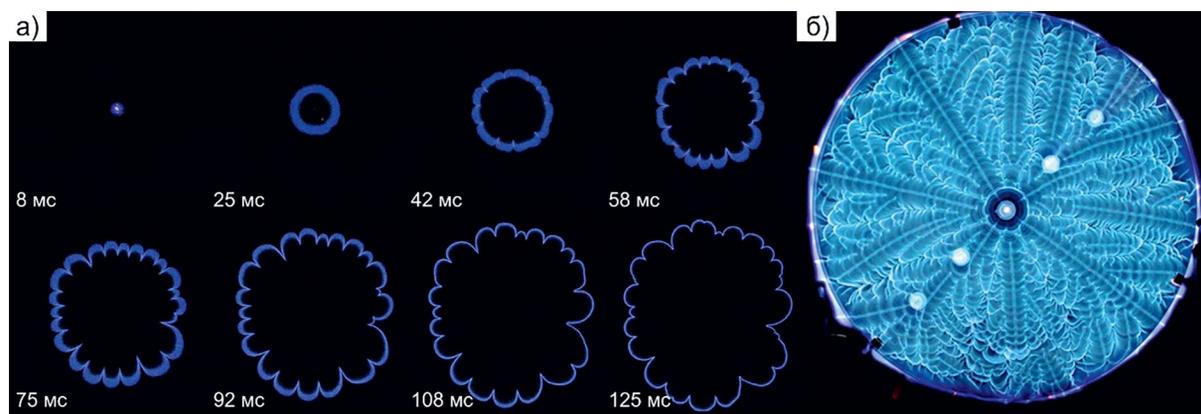


Рис. 2. Фотографии распространения фронта пламени между дисками (а) и фотография этого фронта при длительной экспозиции (б).

воздухом. После заполнения камеры сгорания она открывалась, далее производилось воспламенение газовой смеси с помощью электрической искры, создаваемой высоковольтной катушкой зажигания. В экспериментах происходило горение только той газовой смеси, которая перед зажиганием заполняла пространство между дисками, т.е. в процессе горения газовая смесь дополнительно не подавалась.

Катушка зажигания преобразовывала постоянный ток низкого напряжения 12 В от источника в короткий электрический импульс с напряжением до 35 000 В. Импульс от катушки подавался на два электрода, верхние края которых выступали над поверхностью нижнего диска. В искровом промежутке 3–6 мм между электродами возникала искра, при помощи которой производилось воспламенение газовой смеси.

Фотографирование и видеозапись процесса распространения пламени выполнялись современными цифровыми камерами: зеркальной цифровой камерой Sony DSLRA580 и высокоскоростной видеокамерой AOS Technologies AGX-PRI с автоматической отправкой записанных файлов в персональный компьютер для последующей обработки в графическом редакторе GIMP 2.10.34. Также над дисками устанавливался фотоаппарат Canon EOS 30D с краткосрочной экспозицией 1/500 с для мгновенной фотосъемки видимой части пламени с открытым затвором и формирования изображения из нескольких фотографий.

Фотокамеры располагались на необходимом расстоянии непосредственно над прозрачным верхним диском. Качественное

изображение фотографий получалось благодаря дополнительной подсветке дисков внешними источниками света. Фотографирование распространения пламени позволяет получать высококачественные видеозаписи и фотографии для анализа экспериментальных изображений и распределений интегральной энергетической светимости на них после программной обработки на компьютере.

На рис. 2а приведена серия мгновенных снимков фронта пламени в последовательные моменты времени, на рис. 2б – фронт пламени, снятый при длительной экспозиции. Кроме качественного описания формы фронта пламени и характера его движения, используемая техника позволяет зафиксировать промежутки времени между снимками и тем самым определить координаты фронта в различные моменты времени, его мгновенную и среднюю скорости перемещения, число возмущений (ячеек и складок) на его поверхности, их длину и амплитуду. В экспериментах зафиксировано, что при центральном воспламенении смеси фронт пламени сохраняет свою относительную симметрию. Мгновенные снимки, подтверждающие это, приведены на рис. 2а.

Турбулентные возмущения на фронте пламени начинают формироваться от центральной точки зажигания. Серия фотографий (рис. 2) позволяет сделать вывод о том, что рядом с краями дисков установки длина волны и амплитуда возмущений на поверхности пламени становятся меньше. Светящиеся линии на фронте пламени являются траекториями движения границ между крупными и мелкими ячейками

на пламени в камере сгорания. При движении фронта пламени на нем возникают возмущения, которые выглядят как складки, разделяющие поверхность фронта на ячейки. Ячейки на фронте пламени представляют собой отдельные структуры, связанные с увеличением площади его поверхности, ограниченные гидродинамическими стоками горючей смеси из-за образования в продуктах сгорания вихревого неоднородного течения. На рис. 2б видны белые пятна, которые представляют собой заглушки отверстий в нижней пластине. Отверстия добавлены в нижний диск — для изучения влияния точки зажигания на поведение фронта пламени. В описанных экспериментах точка зажигания не менялась.

Совместное использование моментальной прямой фотосъемки и фотосъемки с задержкой по времени дает возможность определить закономерности распространения фронта пламени. Представленная оригинальная установка и полученные результаты могут использоваться для изучения газозадушенного пламени в различных моделях камер сгорания нового типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Almarcha C., Radisson B., Al Sarraf E., Villermaux E., Denet B., Quinard J.* // *Phys. Rev. E.* 2018. V. 98. P. 030202. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.030202
2. *Yakush S.E., Semenov O.Yu., Alexeev M.M.* // *Energies.* 2023. V. 16. № 3. Paper 1516. P. 1. DOI: 10.3390/en16031516
3. *Wongwiwat J., Gross J., Ronney P.D.* // In *Proceedings of the 25th ICDERS.* Leeds. UK. 2–7 August 2015. P. 3. URL: <http://www.icders.org/ICDERS2015/abstracts/ICDERS2015-258.pdf>
4. *Tayyab M., Radisson B., Almarcha C., Denet B., Boivin P.* // *Combust. Flame.* 2020. V. 221. P. 103. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.030
5. *Alexeev M.M., Semenov O.Y., Yakush S.E.* // *Combust. Sci. Technol.* 2018. V. 191. P. 1256. DOI: 10.1080/00102202.2018.1521394
6. *Jang H.J., Jang G.M., Kim N.I.* // *Proc. Combust. Inst.* 2019. V. 37. P. 1861. DOI: 10.1016/j.proci.2018.06.112
7. *Bychkov V.V., Liberman M.A.* // *Phys. Rep.* 2000. V. 325. P. 115. DOI: 10.1016/S0370-1573(99)00081-2
8. *Matalon M.* // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2007. V. 39. P. 163. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092153
9. *Alekseev M.M., Smirnova I.V., Semenov O.Y., Samsonov V.P.* // *Technical Physics Letters.* 2012. V. 38. № 11. P. 1010. DOI: 10.1134/S106378501211017X
10. *Zeldovich Y.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M.* *The Mathematical Theory of Combustion and Explosions.* New York: Consultants Bureau, 1985.
11. *Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C.* // *Amer. Phys. Soc.* 2019. V. 4. P. 1. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.121201
12. *Fernandez-Galisteo D., Kurdyumov V.N., Ronney P.D.* // *Combustion and Flame.* 2018. V. 190. P. 133. DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.11.022

Адрес для справок: Российская Федерация, 628412, ХМАО – Югра, г. Сургут, просп. Ленина, 1, Сургутский государственный университет. E-mail: [ous.tutor.phinma@mail.ru](mailto:ous.tutor.phinma@mail.ru)